

改进的 T-PPM 编码在大气弱湍流下的性能分析

郭 强

中国海洋石油总公司, 北京 100010

摘要 网格编码调制(TCM)与脉冲幅度调制(PPM)相结合的 T-PPM 编码具备了双方在纠错能力和发射功率效率方面的优点,在空间光通信中有广阔的应用前景。而传统的 T-PPM 编码调制技术在映射方面存在缺陷,制约了系统的可靠性。为改善大气湍流光通信系统的误码性能,提出一种适用于单载波弱湍流空间光信道的改进型 T-PPM 技术。这种方法采用格雷映射取代传统 TCM 中的“子集划分”映射,降低接收时的误判可能性。仿真结果表明,格雷码映射能显著改善误码性能;在误码率为 10^{-3} 处,格雷码映射相比子集映射提高了约 0.2 dB 增益,有效改善系统的差错性能;在 1 ps 和 2 ps 展宽量条件下误码率(BER)分别减少至传统方案的约 1/2 和 4/5,从而验证了格雷码映射的优越性。

关键词 光通信;空间光通信;网格编码调制;格雷码;湍流

中图分类号 TN929.12 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP51.080605

Performance Analysis of Improved T-PPM Technology on Atmospheric Turbulence

Guo Qiang

China National Offshore Oil Corp., Beijing 100010, China

Abstract T-PPM code combines trellis coded modulation (TCM) and pulse amplitude modulation (PPM). It has both advantages in error correction and power efficiency of emission signal, and it has broad application prospects in space optical communications. The traditional T-PPM modulation and coding has shortage in mapping steps which limits the reliability of the system. In order to improve the bit error performance of atmospheric turbulence optical communication system, an improved T-PPM technology suitable for single-carrier weak turbulence is proposed. It uses Gray code mapping instead of the traditional “subset” mapping of TCM to reduce the possibility of error decision in receiving. Simulation results show that Gray code mapping can obviously improve bit error performance; at the bit error rate (BER) level of 10^{-3} , compared with “subset” mapping, the Gray code mapping increases coding gain by about 0.2 dB; at pulse expansion level (1 ps and 2 ps), the Gray code mapping scheme can reduce the BER to about 1/2 and 4/5 of that of conventional “subset” mapping scheme, thus proving the priority of Gray code mapping.

Key words optical communications; space optical communication; trellis coded modulation; Gray code; turbulence

OCIS codes 060.2605; 200.2610; 200.4740; 120.4820; 200.4560

1 引言

近年来,随着激光器成本的下降和高灵敏度感光元件的发展,空间光通信继 20 世纪 60 年代以来再次成为重要的研究方向之一。它具有保密性好、频带宽、与光纤通信相比造价低、施工便捷等优势,受到了人们的广泛关注^[1-6]。但是大气湍流效应严重影响了空间光通信系统的通信质量,使传输系统的误码率急剧增大。因此,寻找适当的调制、编码方式来降低误码率一直是学者们研究的重点。

脉冲位置调制(PPM)是一种能量利用率高的调制方式,相对传统的幅度键控[多进制振幅键控(MASK)和通断键控(OOK)等],它可以降低激光器的平均发射功率,提高功率利用率,非常适用于衰减湍流现象严重

收稿日期: 2014-02-18; 收到修改稿日期: 2010-03-10; 网络出版日期: 2014-07-23

作者简介: 郭 强(1969—),男,硕士,高级工程师,主要从事计算机技术和通信技术等方面的研究。

E-mail: guoqiang@cnooc.com.cn

的空间光通信,有助于提高空间光通信的可靠性,并已得到了广泛研究。但是PPM的频带利用率较低且易受到大气湍流现象的干扰。而网格编码调制(TCM)在不降低频带利用率,不扩展带宽的情况下,能够有效改善误码性能。对TCM和脉冲类调制的结合技术,国内已有一些相关研究^[7]。因此,将TCM与PPM结合起来的T-PPM编码调制方式,是空间光通信中的一种理想解决方案。Kiasaleh等^[8]验证了将TCM与PPM技术结合使用在光通信系统中有良好的性能,在保留一定纠错能力的同时降低了光发射功率,在接受脉冲扩展到四个时隙的信道中,误码率相同的T-PPM比PPM发射光功率降低了2 dB。Arora等^[9]研究了T-PPM在红外无线光通信系统中的性能,指出T-PPM有效地提高了系统的性能。但是,在标准方案中,TCM编码信息向PPM符号映射的过程中使用“子集划分”方法,这种方法在正交幅度调制(QAM)等多载波系统中具有最优性能^[10],但是在PPM调制的单载波系统中的性能并未得到证实。本文基于此提出了一种基于格雷码的新型映射方式,并对采用这种新型映射方式的改进T-PPM编码在弱湍流下的性能进行了分析研究。

2 T-PPM光通信系统

图1是一个典型的光T-PPM通信系统结构图,反映了光T-PPM信号从发送到接收的过程。从信号源发送出的 n 位二进制信息进入TCM编码模块,TCM编码模块为“2进3出”,所以编码后变为 $3n/2$ 位二进制信息。此二进制信息每3位映射为一组8位的二进制信号,然后进入8-PPM调制模块,被调制为8-PPM信号,8个时隙组成的一个信号帧,激光器在相应时隙激发光脉冲形成光脉冲信号。光脉冲经过大气光信道传输到达接收端的光电检测模块进行光电检测,在这个过程中大气湍流、接收机噪声都会对发射的光脉冲信号产生影响。随后在PPM解调模块中对数字化之后的PPM信号进行最大似然解调,判决出光脉冲所在的时隙,将时隙位置恢复为8-PPM信号。8-PPM信号经过逆映射后还原为二进制信息。在TCM解码模块中,采用维特比译码算法译码产生输出信息。

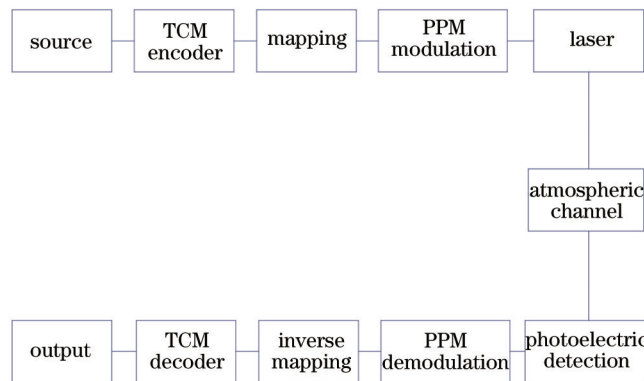


图1 典型的光T-PPM通信系统结构

Fig.1 Typical structure of optical T-PPM communication system

3 大气信道的模型

3.1 大气闪烁效应

空间光通信系统中承载数据的激光必须穿过大气,激光通过弱起伏湍流大气信道时,接受光强存在闪烁效应。闪烁效应是指通过大气信道后,光束强度忽大忽小,光斑忽明忽暗,它是由于空气折射率的随机细微变化,造成接收端相位的随机变化而导致的^[11]。

实验表明在弱湍流区,接收信号的振幅和辐射强度均服从对数正态分布,因此接收信号的闪烁也服从对数正态分布,当接收信号的振幅的对数 χ 服从 $(\langle\chi\rangle, \sigma_{\chi}^2)$ 的正态分布时,接收信号的光强对数服从 $(2\langle\chi\rangle, \sigma_{\ln\chi}^2)$ 的正态分布。

基于Tartaaskii的理论模型,在弱起伏条件下,根据此模型得出平面波水平传输时的对数振幅方差为^[12]:

$$\sigma_{\chi}^2 = 0.31C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (1)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是波数, L 是传输距离。光强的概率分布为

$$P_I(I) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x I} \exp\left\{-\frac{[\ln(I/I_0) + 2\sigma_x^2]^2}{8\sigma_x^2}\right\}, \quad (2)$$

式中 I_0 为光强均值, I 为接收光强。

由于光电探测器的电流与输入光功率成正比^[13], 在均匀场强条件下, 可以认为接收光功率近似服从对数正态分布, 即

$$P_P(P) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x P} \exp\left\{-\frac{[\ln(P/P_0) + 2\sigma_x^2]^2}{8\sigma_x^2}\right\}, \quad (3)$$

式中 P_0 为光功率均值, P 为接收光功率。

3.2 脉冲展宽效应

随着空间激光通信系统传输速率的增加, 由大气湍流导致的脉冲展宽将使相邻脉冲间产生码间干扰, 影响通信系统的传输性能和带宽。假设调制输出的光信号为高斯脉冲, 其载波频率为 w_0 , 振幅为 $v(t)$, 则调制脉冲信号为

$$p(t) = v(t)\exp(-jw_0 t), \quad (4)$$

其振幅表达式为

$$v(t) = \exp(-t^2/T_0^2). \quad (5)$$

T_0 为调制脉冲振幅在 $1/e$ 点处的半宽。若 T_1 为接收脉冲振幅在 $1/e$ 点处的半宽, 则

$$T_1 = \sqrt{T_0^2 + 8\delta}, \quad (6)$$

$$\delta = \frac{0.391(1 + 0.171\delta^2 - 0.287\delta^{5/3})\mu_1 \sec(\zeta)}{c^2}, \quad (7)$$

式中 μ_1 是一个关于海拔的积分量, ζ 表示整个传输链路的天顶角;

$$\mu_1 = \int_{h_0}^{h_f} C_n^2(h)[L_0(h)]^{5/3} dh, \quad (8)$$

式中 h_0 是光发射机所在海拔, h_f 是光接收机所在海拔。

基于 Hufnagel-Valley 模型的折射率结构常数表达式为^[14]

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-23} \left[\sqrt{\frac{\int_0^{20} v^2(h_2) dh_2}{15}} / 27 \right]^2 (h_2/1000)^{10} \exp(-h_2) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-2h_2/3) + A \exp(-10h_2), h_2 = h/1000, \quad (9)$$

式中 v 表示风速 (m/s), 这是一个时变量, 一般取 21; h 表示海拔, 单位为 m; A 定性体现湍流强度, 它是一个依据实测数据设置的常数, 其取值由实测的折射率结构常数决定。

湍流外尺度和内尺度表示为

$$L_0(h) = \frac{5}{1 + [(h - 7500)/2500]^2}, l_0(h) = \delta L_0(h), \quad (10)$$

式中 $0 < \delta < 1$ 。在湍流中传输路径长为 L 时, 对应接收端脉冲强度模型是高斯型的, 方差是 T_1 。

图 2 为脉冲展宽时域图, 可以看出, 随着脉冲的展宽, 信号的振幅是逐步下降的, 进一步对接收脉冲信号的振幅做归一化。其中虚线为已调发送信号的时域脉冲, 实线为经过湍流信道作用后的展宽时域脉冲。可见已调发送信号时域脉冲的宽度 T_0 是 1 ps, 经过湍流信道作用后到达接收端的脉冲是 2 ps, 这样脉冲就扩展到了相邻的时隙。当某一特定时隙的中心抽样点在 -2 ps 处时, 该抽样点将会受到中心抽样点为坐标原点的时隙信号的干扰, 干扰值是 0.1。

4 T-PPM 及其改进方案

通常的网格编码方案首先应设计一个多入-多出的二进制映射逻辑, 然后根据生成的相应网格图来寻找对应的网格编码器。具体的网格编码步骤可以用一个通用的多入多出网格编码结构图来系统说明, 如图 3 所示。

由图 3 所示的结构, 可以根据从左至右的信号流向来清楚观察网格编码的工作原理: 在一个码元间隔共

有 k 个比特的编码输入信息,其中 \tilde{k} 比特经由一个码率为 $\tilde{k}/(\tilde{k} + 1)$ 的系统卷积编码器编码成 $\tilde{k} + 1$ 输出,这 $\tilde{k} + 1$ 个已编码的比特输出的作用是选择 $2^{\tilde{k}+1}$ 进制的已调信号集合中的 $2^{\tilde{k}+1}$ 个分割后的子集,其余的 $k - \tilde{k}$ 个直通的比特作用是选择特定子集中的所有 $2^{k-\tilde{k}}$ 个信号星座点之一。

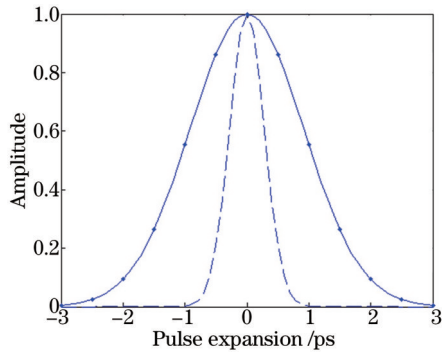


图2 脉冲展宽时域图

Fig.2 Time-domain figure of pulse expansion

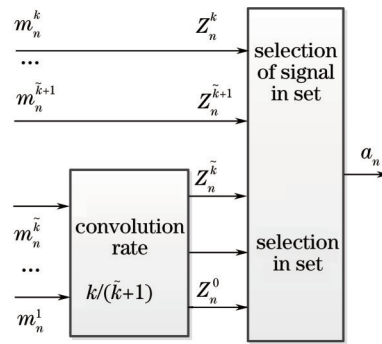


图3 通用的网格编码结构图

Fig.3 Conventional structure of TCM encoder

设计一种合理映射规则,能够有效避免解调译码中的误差概率,这已经成为TCM的关键研究点。自从Ungerboeck创造的“集分割”子集映射方案普及之后,TCM大都采用这种常规方法。基于集分割的子集映射方案的主要思想为对整个已调信号的集合进行子集划分,将其分为不同的次级、三级或者四级的小集合,进行集合分割之后整体最小欧式距离可以得到拓展,每次经过拓展,子集距离就能够增加到之前的 $\sqrt{2}$ 倍,并使得分割后的子集最小欧式距离达到最大值5。每一次分割都是将较大的信号集分割成较小的两个子集。分割后的子集数和其最小距离都相比分割前增加。对于已经被 i 级子集分割后的子集,其自由欧式距离为 $\Delta_i (i=0,1,\dots)$,对 i 从 $0,1,2,\dots$ 取值时, $\Delta_0 < \Delta_1 < \Delta_2 < \dots$ 。由此便可以根据实际情况的需要来确定子集划分程度 i 的大小。

Ungerboeck的集分割映射方法在多载波条件下具有最优性能,但在PPM调制这种单载波调制中的性能是不是最优还有待验证。由前面的讨论得知,空间光信道中存在大气闪烁,脉冲展宽等多种湍流效应的影响,对光信号的传输有着较大的干扰。因此有必要针对空间光信道的特点对T-PPM编码调制方案进行优并。基于此提出了一种改进的T-PPM编码方案,来讨论在弱湍流条件下对系统性能的提升。

众所周知,调制信号的抗干扰性主要取决于已调信号在欧氏空间中距离的大小,即已调信号在欧氏空间中的距离越大,其抗干扰性也就越强。然而在信道编码中,其抗干扰性则主要取决于码之间汉明距离的大小。由于8-PPM调制时是在一帧中的8个时隙中选择一个时隙发送脉冲,因而其欧氏距离的提升极其有限。这时对码元之间汉明距离的优化成为提高系统误码率的重要手段。

采用格雷码映射的PPM调制具有较强的抗干扰能力,其优越性表现在相邻星座符号集间只有1 bit信息不同,也就是说相邻符号之间的汉明距离始终为1,这是优化汉明距离的最佳方案。图4为改进的T-PPM编码的结构图。

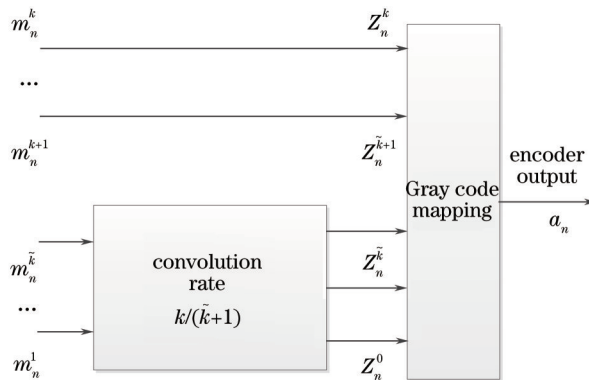


图4 改进的T-PPM编码的结构图

Fig.4 Structure of improved T-PPM encoder

此外为了方便讨论,再介绍一种不常用的自然映射,就是将编码后的比特按自然顺序映射到PPM的码元上,即把编码后的比特看做是二进制数,将其映射到标号为其对应十进制数的码元上。表1为三种不同方案的映射表。

表1 三种不同方案的映射

Table 1 Three mappings of different schemes

Symbol	Nature mapping	Standard mapping	Gray code mapping
0	000	000	000
1	001	010	001
2	010	001	011
3	011	011	010
4	100	100	110
5	101	111	111
6	110	101	101
7	111	111	100

5 仿真分析

考虑8-PPM编码调制系统,码率为2/3时,状态数为4的TCM系统,译码采用维特比算法,采用蒙特卡罗方法进行仿真。大气信道如前面第3部分中讨论,传输信号受到大气湍流的中光强闪烁和脉冲展宽效应的影响。仿真结果图如图5所示。横轴表示信噪比 E_b/N_0 ,表示每比特能量与噪声功率密度(噪声比)之比。噪声方差为 $\ln \sigma_x$;纵轴为误码率(BER)。

由图5可知,改进方案和传统方案的误比特率都要明显优于自然方案的误比特率,说明采用合适的映射方式来映射编码比特和PPM码元是必要的。在误码率为 10^{-3} 时,经过改进的T-8PPM方案比标准方案有0.2 dB的增益,说明格雷码映射的改进方案相对传统子集映射方案改善了T-PPM系统的误码性能。

图6为格雷编码改进方案、子集译码传统方案和自然方案三种方案的误码性能随着脉冲展宽量的变化情况对比。可以通过仿真方法定量比较常规的编码和本文改进后的编码对脉冲展宽的容忍程度。

由图6可知,在同等脉冲展宽量的前提下,格雷映射改进方案相对于子集映射传统方案能够实现明显的BER性能改善(在1 ps展宽量条件下BER减少至传统方案的约1/2,在2 ps展宽量条件下BER减少至传统方案的约4/5),这在仿真角度定量体现出格雷映射对于脉冲展宽现象的更强的容忍度。从而验证了改进方案的优越性。

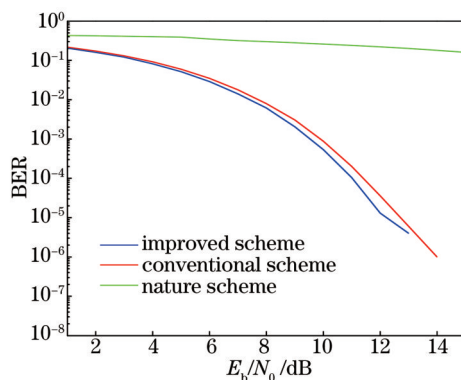


图5 三种映射方案T-PPM系统误码率随信噪比的变化
Fig.5 Relationship between BER and signal to noise of T-PPM system under three mapping schemes

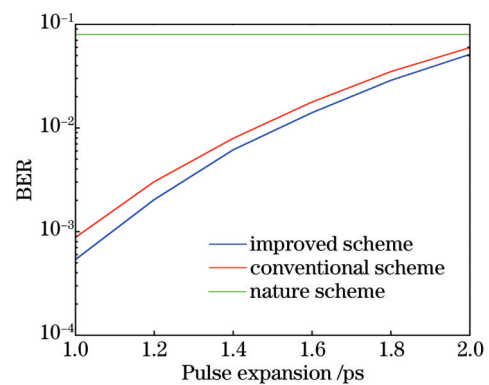


图6 三种映射方案T-PPM系统误码率随脉冲展宽量的变化
Fig.6 Relationship between BER and pulse expansion of T-PPM system under three mapping schemes

6 结论

在TCM与PPM相结合的基础上,提出了一种适用于空间光信道的调制方式,即采用格雷映射代替子

集划分映射,并对弱湍流信道的特点进行了分析。通过仿真发现,有必要对系统的映射方式进行优化。改进的T-8PPM调制方式在弱湍流条件下既综合了TCM与PPM的优点,又提高了空间光系统的误码率,相对于标准的系统,提高了0.2 dB。因此,这种改进的编码调制方式在空间光系统中有良好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Cowley W G, Nguyen K D, Giggenback D. Adaptive symbol-rate free-space-optical communications[C]. Adelaide: Communications Theory Workshop, 2013. 122-127.
- 2 Jia Kejun, Zhao Yangang, Chen Hui, *et al.*. Analysis and methodology study of bit error performance of FSO system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030603.
贾科军, 赵延刚, 陈 辉, 等. 无线光通信系统误码性能分析及方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030603.
- 3 Chen Dan, Ke Xizheng. Modulation recognition of wireless optical communication using subcarrier modulation over atmosphere weak turbulence channel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 070601.
陈 丹, 柯熙政. 大气弱湍流信道无线光副载波调制识别研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 070601.
- 4 Xie Mengqi, Ke Xizheng. Effect of atmospheric turbulence on the signal-to-noise ratio of free space optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(11): 110102.
解孟其, 柯熙政. 大气湍流对无线光通信系统信噪比的影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(11): 110102.
- 5 Leng Jiaofeng, Hao Shiqi, Qu Fuqi, *et al.*. Combination of spatial diversity coherent receivers for wireless optical communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010602.
冷蛟锋, 郝士琦, 瞿福琪, 等. 无线相干光通信空间分集接收合并技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 010602.
- 6 Wang Han, Zhang Tao, Li Sha. Bit-error-rate analysis of FSO-OFDM modulation system over Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 110102.
王 涵, 张 涛, 李 莎. Gamma-Gamma大气湍流下FSO-OFDM调制系统误码率分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 110102.
- 7 Huang Lei, Ke Xizheng, Wu Pengfei. Modeling and simulation of OPPM-TCM system based on FPGA[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(4): 38-43.
黄 蕾, 柯熙政, 吴鹏飞. 基于FPGA的OPPM-TCM建模与仿真[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(4): 38-43.
- 8 K Kiasaleh, Y Tsun-Yee, M Srinivasan. Trellis-coded pulse-position modulation for optical communication systems impaired by pulsewidth inaccuracies[J]. *J Lightwave Technology*, 1999, 17(8): 1336-1346.
- 9 Arora R, G Kour, N Gupta. Performance analysis of T-PPM over PPM for infrared wireless links[C]. Poland: Proceedings of 2004 6th International Conference on Transparent Optical Networks, 2004. 17-23.
- 10 G Ungerboeck. Trellis-coded modulation with redundant signal sets part I[J]. *IEEE Com.*, 1987, 25(2): 12-21.
- 11 Ren Hao, Wei Hongjian, Tan Jichun. Computer simulation of the detection noise caused by atmospheric scintillation in laser communication[J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, 24(5): 22-24.
任 浩, 魏宏建, 谭吉春. 激光通信中大气闪烁引起探测噪声的计算机模拟[J]. *应用光学*, 2003, 24(5): 22-24.
- 12 Zhang Yixin. Propagation and Imaging of Light in Random Media[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 211-214.
张逸新. 随机介质中光的传播和成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 211-214.
- 13 Pan Jun, Jia Zhenhong. Performance analysis of atmospheric laser communication system with subcarrier modulation over Gamma-Gamma turbulence[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007, 18(8): 953-955.
- 14 Cheng Zhi, Hou Zaihong, Jing Xu, *et al.*. High-precision and real-time inversion method of Hufnagel-Valley turbulence profile[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1562-1567.
程 知, 侯再红, 靖 旭, 等. Hufnagel-Valley湍流强度廓线的高精度实时反演方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1562-1567.